

天线反射器复合材料轻量化研究

董晓阳¹ 郭金海¹ 吴文平¹ 史文锋¹ 陈浩然²

(1 上海复合材料科技有限公司,上海 201112)

(2 南京航空航天大学,南京 210016)

文 摘 采用树脂基复合材料代替铝合金材料研制反射器满足天线反射器减重要求,并建立反射器 3D 模型,通过有限元软件分别对铝合金以及复合材料反射器的模态进行分析。结果表明:在保持相同体积的条件下,复合材料反射器基频比铝合金反射器高出 35.23%,减轻 41.2%;为了保证星载反射器在服役环境中的精度,对两种材料反射器在 $-180\sim+80^{\circ}\text{C}$ 的热变形进行仿真。结果显示:采用 $[0/45/-45/90]_{28}$ 铺层设计的反射器热变形量比铝合金反射器低 94.25%;采用模压工艺研制的复合材料反射器型面精度为 0.027 mm,满足使用要求,并且在服役环境下,复合材料型面精度稳定性优于铝合金反射器。

关键词 天线,反射器,复合材料,有限元,轻量化

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.04.008

Reduction of Weight of Antenna Reflector Using Lightweight Composite

DONG Xiaoyang¹ GUO Jinhai¹ WU Wenping¹ SHI Wenfeng¹ CHEN Haoran²

(1 Shanghai Composite Technology Co.Ltd,Shanghai 201112)

(2 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 2100162)

Abstract In order to reduce antenna reflector weight, the aluminum alloy is replaced by resin composite. The 3D model of antenna reflector was designed. The model of antenna reflector with two kinds of material were simulated by finite element software. The results show that the composite antenna reflector fundamental frequency is 35.23% higher than that of aluminum alloy at the same volume and the weight reduces 41.2%. The thermal deformation of antenna reflector with two kinds of material were simulated at the temperature between -180°C and $+80^{\circ}\text{C}$, the composite reflector thermal deformation is 94.25% less than aluminum alloy while the plies are $[0/45/-45/90]_{28}$ to the composite reflector root mean square (RMS) is 0.027 mm, the RMS stabilization of composite reflector is superior to aluminum alloy in deep space.

Key words Antenna, Reflector, Composite, Finite element, Lightweight

0 引言

天线反射器是通讯链路的主要结构,通过电磁波接收和发射将测量数据反馈地面并进行分析实验。反射器一般设计成为卫星主体结构外的附属结构获得宽阔的视场来确保通讯质量,通过连接结构将反射器与本体结构相连接。为了保证反射器工作面的高精度,要求反射器具有足够大的刚度避免型面发生变形影响反射面精度。天线反射器另一要求是质量控制,据报道,每减少 1 kg 发射质量,则节省发射费用 1~2 万美元^[1]。此外,将节约的质量可以用于其他有效载荷的设计,提高有效载荷利用率。纤维增强树脂基复合材料因其高的比强度、比模量、减重性能在航天器结构上得到广泛应用。

国际通讯卫星 VA 中心推力筒采用纤维增强树脂基复合材料研制,与传统金属材料相比减重达到 23 kg^[2],某民用卫星采用复合材料代替金属支架,减重 4 kg。采用化学刻蚀法以及低密度纤维粉、高强度聚氨酯泡沫制备的反射器质量明显减轻^[3],国外采用复合材料对反射器进行轻量化设计,制造口径 1.22 m 反射器^[4]。反射器由于其服役特性,要求反射面具有高的型面精度保证通讯稳定。此外,卫星服役空间环境存在交变热载荷导致结构失效,最著名的案例就是哈勃空间望远镜的热载荷失效^[5];传统的金属材料存在固有的热胀冷缩特性,影响反射器型面精度^[6-7],纤维复合材料具有各向异性的膨胀系数,通过铺层设计产生较小的变形维持反射面型面精

收稿日期:2017-05-11

基金项目:国家 863 高科技发展计划(2015AA03A201);上海市经信委产学研(沪 CXY-2013-8)

第一作者简介:董晓阳,1988 年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构反射器研究工作。E-mail:donxiaoyang1112@163.com

度^[8-9]。反射器的锁定方式、背筋与反射器粘接片、胶膜厚度、复合材料铺层方式等因素对天线反射器基频、热变形有重要影响^[10-11]。本文开展了天线反射器复合材料轻量化研究。

1 反射器结构及边界条件

天线反射器结构如图 1 所示,反射器口径 500 mm,为抛物线沿 z 轴扫略 360°成抛物面。柱状法兰翻边设计,连接均布连接块。连接块底面加工安装孔,通过支杆与主反射器装配,柱状法兰开孔减重。型面精度 $RMS \leq 0.05$ mm。

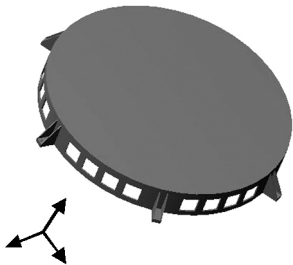


图 1 反射器结构

Fig.1 The structure of reflector

反射器网格化结构如图 2 所示,采用 3D 实体建模,有限元模型中单元为 C3D8R,单元数 5299,节点数 9953;反射器四周均布六个连接法兰加工孔,通过支杆与主反射面连接,将连接法兰采用固定约束。反射器随机振动载荷施加在模型约束连接法兰上,随机

载荷频率谱密度 $0.04 \text{ g}^2/\text{Hz}^{[12]}$,沿着反射面轴线(z)方向加载。

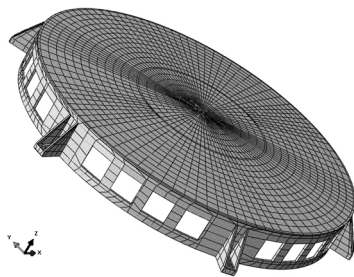


图 2 反射器有限元模型

Fig.2 The FEM model of reflector

2 模态分析及随机振动载荷仿真

2.1 模态分析

2.1.1 铝合金反射器模态分析

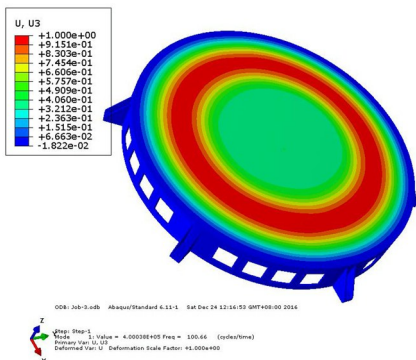
选择 2A12T4 铝材制备反射器,其材料性能如表 1 所示。

表 1 铝合金材料性能

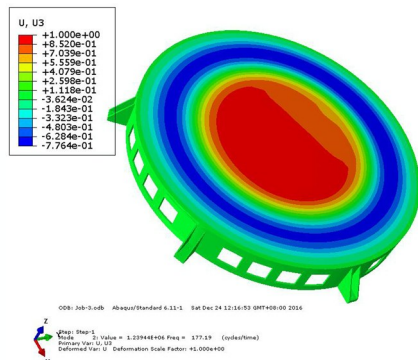
Tab.1 The material property of aluminum alloy

$\alpha/10^{-6} \text{K}^{-1}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E/GPa	ν
23	2.78	76	0.32

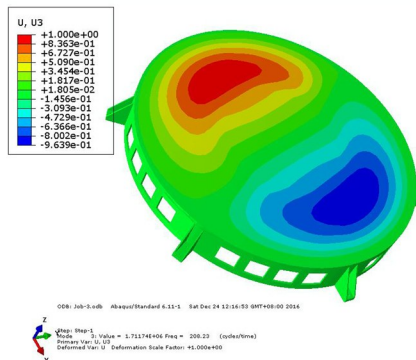
将材料属性赋予模型,并进行仿真,其结果如图 3 所示,在上述边界条件约束下,壁厚 3 mm 铝合金反射器的振动基频为 100.66 Hz;其质量为 2.01 kg。



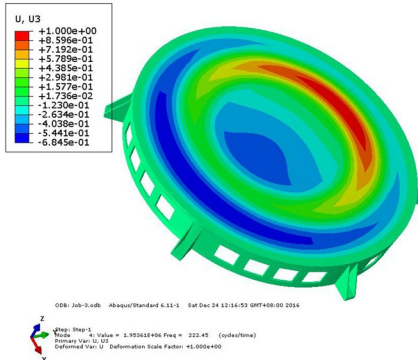
(a) 一阶模态 (100.66 Hz)



(b) 二阶模态 (177.19 Hz)



(c) 三阶模态 (208.23 Hz)



(d) 四阶模态 (222.45 Hz)

图 3 铝合金反射器模态

Fig.3 The modal of aluminum alloy reflector

2.1.2 复合材料反射器模态分析

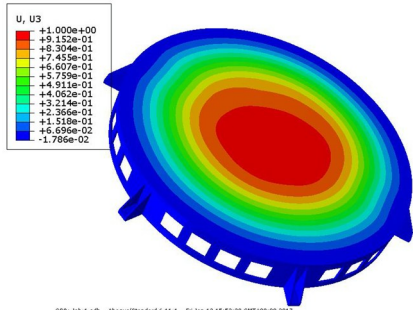
为了满足反射器高强度要求,采用高强度碳纤维作为增强材料,环氧树脂作为基体,制备单层厚度 0.18 mm 的预浸料,其单向板力学性能如表 2 所示^[13]。将材料属性赋予模型,按照单层厚度 0.18 mm 设计铺层,为了保证反射器的型面精度,采用准

各向同性铺层 $[0/45/-45/90]_{2S}$,其模态如图 4 所示。

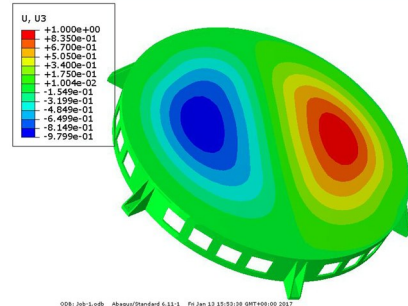
表 2 复合材料单向板性能

Tab.2 The material property of composite

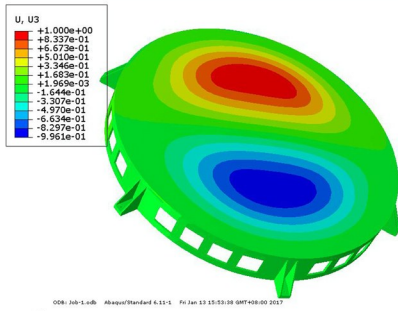
$\alpha_0/10^{-6}K^{-1}$	$\alpha_{90}/10^{-6}K^{-1}$	$\rho/g\cdot cm^{-3}$	E_t/GPa	E_c/GPa	E_b/GPa	ν
-0.12	35.4	1.66	161	158	157	0.27



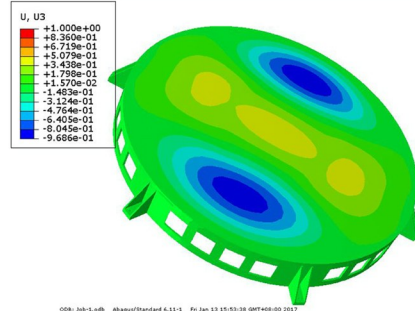
(a) 一阶模态 (136.13 Hz)



(b) 二阶模态 (211.76 Hz)



(c) 三阶模态 (217.07 Hz)



(d) 四阶模态 (364.85 Hz)

图 4 复合材料反射器模态

Fig.4 The modal of composite reflector

复合材料副反射面基频为 136.13 Hz,质量为 1.2 kg。与铝合金反射器相比,其基频提高 35.23%;质量减轻 41.2%;达到在满足基频条件下减重的要求。

2.2 反射器随机振动载荷分析

反射器作为卫星结构的重要组成部分,在运载火箭的推力作用下被运送到固定轨道。火箭在发射过程中会遭受来自多方面的外部载荷激励引起随机振动^[14]。包括空气阻力、噪声环境等激励载荷。反射器在发射过程中承载随机振动,通过有限元仿真得到反射器在随机振动条件下的动力学响应。仿真试验加载的频率为 20~2 000 Hz,功率谱密度为 0.04 g^2/Hz ^[12];通过试验规范法等等效于峰值加速度 0.12 g^2/Hz ^[15]。振动频率谱密度曲线如图 5 所示。加载点为六个连接块安装位置,方向为反射器轴向(z 向),在有限元软件中通过设置分析步 Frequency 和 Random Respond,编辑关键词 Base Motion 将随机振动激励加载在固定连接块,编辑关键词将随机振动频率谱密度曲线(PSD)输入激励载荷^[16],得到反射器轴向(z 向)随机位移响应,其位移云图如图 6 所示。由图 6 分析可得出,在随机宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 4 期

振动载荷条件下,复合材料与铝合金材料制备的反射器轴向最大位移出现在反射背面加强筋位置,位移量分别为 7.1×10^{-8} 和 1.1×10^{-7} mm;铝合金变形量比复合材料高出 54.9%,并且铝合金反射器在反射面出现较大面积变形,对反射面型面精度影响大。在随机振动载荷条件下,复合材料高模量可以降低反射面变形量,维持较高的形面精度。

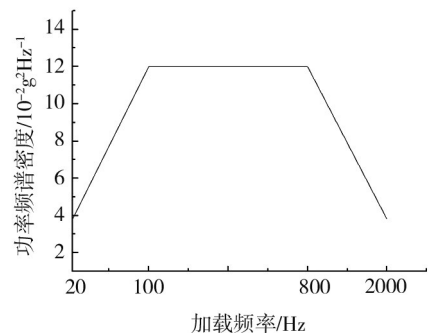
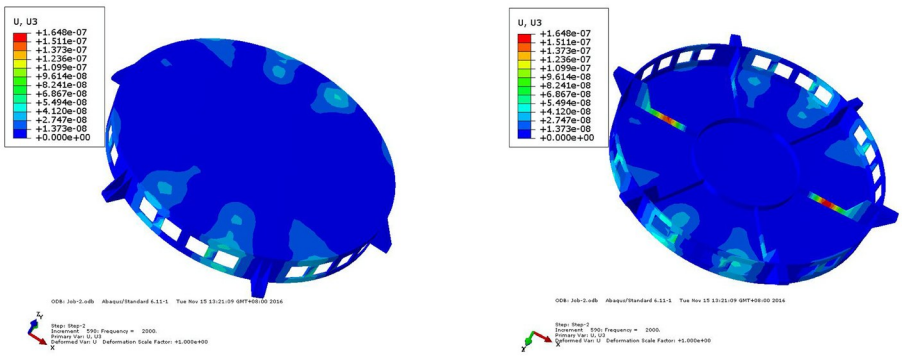
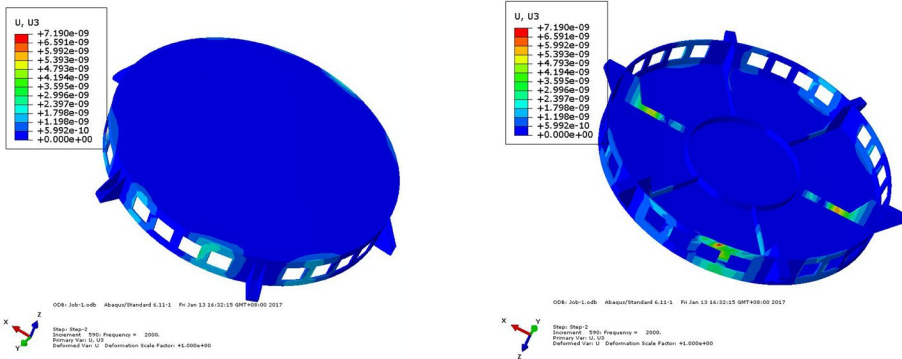


图 5 振动频率谱密度曲线

Fig.5 The PSD curve



(a) 铝合金反射器随机振动 z 向位移



(b) 复合材料反射器随机振动 z 向位移

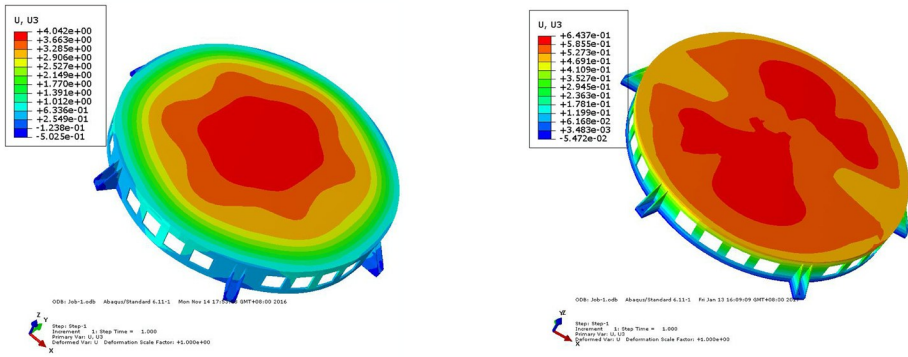
图 6 反射器随机振动 z 向响应

Fig.6 The z-random respond of reflector

3 热变形仿真

由于复合材料与铝合金导热性能不同,对两种不同材料制备的反射器进行热变形分析。实际反射器所在轨道空间环境温度变化 $-180 \sim +80^{\circ}\text{C}$ [12],采用预

设温度场方法对反射器施加热激励载荷,温度范围从实际空间温度的 $-180 \sim +80^{\circ}\text{C}$,温度场稳态均匀分布,得到的反射器形面热变形云图如图 7 所示。



(a) 铝合金反射器

(b) 复合材料反射器

图 7 反射器热响应

Fig.7 The thermal respond of reflector

由图 7 可知,铝合金的反射器温度在 $-180 \sim +80^{\circ}\text{C}$ 内,其沿着旋转轴向的最大变形量为 4.042 mm,采用形面拟合得到 RMS 值为 0.65 mm;复合材料反射器其热变形量为 0.643 mm,采用形面拟合得到 RMS 值为 0.038 mm;复合材料反射器在热载荷环境具有更低的热变形,型面精度热稳定高;铝合金反射器中心位置变形量与反射面边缘变形量差值为 3.03 mm;而复合材料反射面中

心位置与边缘位置热变形量差值为 0.174 mm;其变形量低 94.25%;型面精度高出 161%,在 $-180 \sim +80^{\circ}\text{C}$ 内具有较高的型面精度保持能力,满足反射器对形面精度的要求。

4 反射器制备及型面精度测量

4.1 反射器制备

反射器的蒙皮外表面为工作面,其对型面精度有

较高的要求,四周均布的连接块底平面为基准平面,要求底平面与旋转轴保持较高的垂直度,模具设计采用模压一体化共固化工艺。工作面整体成型,加强筋以及连接块采用外拼块成型。根据仿真结果,按照 $[0/45/-45/90]_{25}$ 铺层,铺层完成放置压机进行固化,其固化曲线如图8所示。脱模后通过修整的复合材料反射器以及通过机加工成型的铝合金反射器。采用电子天平称重,复合材料反射器质量为1.18 kg,铝合金反射器质量2.03 kg,减轻41.2%。

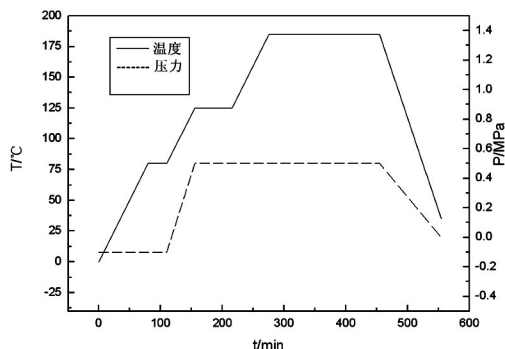


图8 固化曲线

Fig.8 The curing curves

4.2 型面精度测试

制备完成的反射器采用拍照法进行型面 RMS 测试,检测设备为德国 GOM 公司 ATOSII + TRITOP 三维光学扫描设备,在反射器测量型面均布测量靶标点,将反射器扫描点云数据与设计三维 CAD 数模进行整体坐标配准后,计算结果表明,铝合金反射器型面 RMS 为 0.016 mm;复合材料反射器型面 RMS 为 0.027 mm,满足反射器形面精度 ≤ 0.05 mm 的要求。

复合材料反射器型面精度比铝合金反射器低的原因与制备反射器工艺有关,铝合金反射器采用精加工方法制备,尺寸精度受到加工设备影响,而复合材料反射器成型需要在高温高压条件下基体树脂与增强纤维复合,复合材料两相的性能差异导致固化后脱模产生微量变形,引起型面精度降低,但是满足 RMS ≤ 0.05 mm 的使用要求。根据热变形仿真分析结果,复合材料在 $-180 \sim +80^\circ\text{C}$ 空间环境中具有低的热变形量,在随机振动激励载荷条件下反射面变形量小,型面稳定性更高,减重效果明显。

5 结论

(1)在相同体积条件下,铝合金反射器基频为 100.66 Hz,复合材料反射器基频 136.13 Hz,采用复合材料制备的反射器具有更高的基频。

(2)在随机振动激励载荷条件下,复合材料反射

面轴向变形量比铝合金材料小 54.9%。

(3)复合材料反射器型面 RMS 为 0.027 mm,铝合金反射器型面 RMS 为 0.016 mm,在空间环境温度条件下复合材料反射器热变形量比铝合金低 94.25%。

(4)在满足基频以及型面精度要求前提下,复合材料反射器比铝合金反射器减轻 41.2%。

参考文献

- [1] 徐德康. 低成本卫星空中发射系统[J]. 国际航空, 2015(4):80-81.
- [2] 何晓东. 先进复合材料在航空航天应用[J]. 高科技纤维应用, 2006, 21(2):9-11.
- [3] 张晨辉, 张晟, 杨尚杰. 某雷达天线反射器轻量化研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(1):71-73.
- [4] DAVID W, DRAPER, MEMBER et al. the global precipitation measurement microwave imager: instrument overview and early on-orbit performance[J]. Iee Journal of Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(7).
- [5] THORNTON, E A, KIM. Thermally induced bending vibrations of a flexible rolled-up solar array[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993, 127(3):247-253.
- [6] 徐宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6):1488-1495.
- [7] 辛宏伟, 杨近松, 高明辉等. 高分辨力空间遥感器次镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9):1725-1731.
- [8] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [9] OGUAMANAM D C D, HANSEN J S, HEPPLER G R. Nonlinear transient response of thermally loaded laminated panels[J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 71(1):49-56.
- [10] 姚科, 杨军, 韦娟芳. 星载固定反星载固定反射天线热变形分析[J]. 低温建筑技术, 2016(2):67-69.
- [11] 李伟, 张明, 朱大雷等. 复合材料薄壁加筋抛物面天线仿真与优化[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(6):27-31.
- [12] 柯受全. 卫星环境工程和模拟实验[B]. 北京: 中国宇航出版社, 2009:55-56.
- [13] 顾红星, 王浩静, 范立东等. HKT800 碳纤维/AG/80 环氧树脂复合材料制备及性能[J]. 功能材料, 2015, (15):10-14.
- [14] SCIENTIST G, DRDL HYDERABAD. Vibration environment and the rockets[J]. Procedia Engineering, 2016, 144(3):345-348.
- [15] 张玉梅, 韩增尧, 邹元杰. 随机振动环境下航天器结构强度设计方法综述[J]. 力学进展, 2012, 42(4):464-470.
- [16] 李虎, 张峰. 星载天线动力学仿真分析[J]. 科技创新导报, 2016, 56(2):56-58.